

# 机场弱膨胀高填土浅层强夯加固参数设计

杜 俭<sup>1</sup>, 徐昭慧<sup>2</sup>

(1. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038; 2. 空防四处, 陕西 宝鸡 721006)

**摘 要:**根据弱膨胀土的变形特征和施工特点,讨论并确定了弱膨胀高填土浅层强夯加固处理的原则和参数设计。结合工程实际,提出了确定夯击能量、夯击次数等主要参数简便易行的工程方法。现场测试结果表明:该方法能在短期内完成浅层填土固结沉降,有效提高地基强度,缩短工期,降低工程造价。

**关键词:**弱膨胀土;高填土;浅层强夯;参数设计

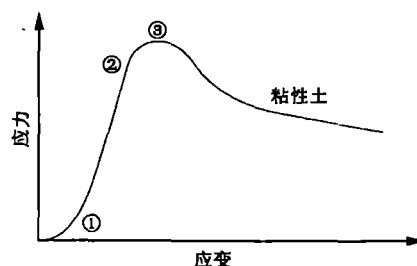
**中图分类号:**V35;TU751.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-3516(2004)01-0022-05

由弱膨胀土构成的高填土,其沉降方式和加固机理具有特殊性,与石方或由土石混合填料构成的高填土有所不同。特别是对于浅层填土而言,因填筑时间较短,剩余沉降尚未完成,加之具有弱膨胀潜势,表层遇水后产生不同程度的膨胀变形,对填土的固结沉降及其机场道面施工质量和工期影响较大。为了很好地解决浅层弱膨胀高填土的膨胀变形问题,该论文结合工程实际提出了意在缩短工期、节约投资的浅层强夯加固处理方法。并从理论及施工方法上,就如何科学地确定夯击参数进行了研讨。通过西南某机场工程实际应用,取得了显著的经济效益,证明该法具有广泛地应用价值。

## 1 弱膨胀土的变形特征与强夯加固机理

### 1.1 弱膨胀土的变形特征

根据古典土力学理论,无论粘性土或是无粘性土,在三轴试验条件下,其应力-应变特征可用图1的典型曲线来表达。通过实际工程现场观测,这一典型曲线也反映了弱膨胀土的变形特征及其不同应力水平下高填土的变形趋向。图1中,土体的变形可分为三个阶段。即:①非线性的初始变形阶段;②弹性变形阶段;③非线性的塑性变形阶段。大部分实验数据表明,对于新填土来说,应力-应变曲线极为明显的存在初始非线性变形阶段,恰好反映了新填土在常规压实条件下还有一定疏松性,固结沉降尚未完成。与此同时,表层弱膨胀土遇水后,产生不同程度的膨胀变形,使土的变形及地基固结沉降显得更加复杂。



### 1.2 强夯加固原理

填土属结构扰动土,土颗粒间的接触应力很小,特别是对于粗颗粒含量较多的填土,其振动特性介于粘土与砂土之间,在强夯波动能量作用下,因为气相的压缩性比固相和液相的压缩性大得多,所以气相部分首先被排出,颗粒重新排列,孔隙大为减小。同时,孔隙中液体也因受力而变形,不过这些变形相对于土颗粒间的移动、孔隙的减小来说是较小的,所以非饱和填土的夯实变形主要是由于土颗粒的相对位移引起的。而对于高含水量的填土,具有明显的减振和易于产生流变的特性。因此,高含水量填土的强夯机理概括为:①随着超孔隙水压力的逐渐增大,使饱和土体的渗透系数增大,加速了饱和

收稿日期:2003-03-12

基金项目:军队科研基金资助项目

作者简介:杜 俭(1955-),男,甘肃临洮人,副教授,主要从事机场工程及岩土工程研究。

土体的固结。②在重锤夯击作用下,产生瞬间的有效压缩变形,使土颗粒互相移动、靠拢,结合水膜减薄,多余的水则从四周逸出,超孔隙水压力消散,土体从而达到新的稳定状态。③在反复夯击作用下,超孔隙水压力不断增加,致使土中有效应力减小,当土中某点的超孔隙水压力等于上覆的土压力时,土中有效应力完全消失,土体局部液化,之后随着孔隙水的排出,超孔隙水压力很快消散,使土体抗剪强度和变形模量明显增加。夯后经过一段时间的静置后,由于胶体颗粒(约为0.000 1mm)的分子水膜重新逐渐联结,恢复其原有的稠度并形成新的空间结构,使土体又恢复并达到更高的强度。

### 1.3 浅层强夯设计基本原则

1) 强夯处理后地基力学指标应满足:①地基承载力大于200 kPa;②地基的变形模量 $E_0 \geq 15$  MPa;③回弹模量 $E_H \geq 50$  MPa;④地基不均匀沉降小于1:1 000,即弯沉半径小于50 m,盆顶与盆底沉降量之差小于50 mm;⑤地基最终沉降量小于50 mm。

2) 对于软弱泥泞地段应增设级配砂砾石骨料垫层,既满足机械设备的行走作业,同时可改善表层弱膨胀土的级配和变形特性。但垫层不能太厚,否则会起到消能的副作用,而且不经济。垫层愈厚,夯击效果愈差。

3) 夯坑四周不能发生过大隆起,如果隆起过大,说明夯击能损失较大,下面已变成橡皮土,能量消耗在表层,对地基深层加固作用不大。此时应修正最佳夯击能或增减夯击遍数。

### 1.4 施工技术要点

1) 整平原地面,确保夯击能均匀传递到地面以下,平整度控制在 $\pm 100$  mm。

2) 在施工现场用石灰或木桩标出夯点的中心,夯击点中心间距偏差在150 mm范围内;强夯机具按照石灰线进行对点就位;夯击时若发现坑底倾斜而造成夯锤偏斜时,对夯坑进行回填整平,将夯坑位置偏差控制在 $\pm 200$  mm范围内;夯锤落距误差控制在100 mm内;最后两击平均夯沉量小于60 mm。

3) 夯后回填的零线处,采用台阶搭接处理,每级台阶宽度2 m,高度10 cm。

4) 强夯施工过程中应注重信息反馈,对每个夯点的夯击能量、夯击击数、每击夯沉量、最后两击平均夯沉量、累计夯沉量、夯坑周围地面变形情况等做好详细记录,必要时做修正和调整,并按修正和调整后的施工工艺进行施工。

## 2 浅层强夯参数设计

### 2.1 有效加固深度

考虑到地基条件及填土特性的不同,强夯有效加固深度应根据现场试夯,并经实测与理论计算结果对比分析后,按公式 $D' \approx \alpha \sqrt{Wh/10}$ 计算。式中: $\alpha$ 为有效影响系数,根据工程施工特点和弱膨胀土特性指标统计分析, $\alpha$ 值选用0.68; $W$ 为夯锤质量; $h$ 为夯锤落距。

### 2.2 夯击能量

根据场区内填土类型及填筑厚度不同的特点,将其分为4个区。即填土厚度0 m~5 m区,5~8 m区,8~13 m区和大于13 m区。本着既要满足工程要求,又要降低工程造价的原则,经理论计算,0~5 m区所需单击夯击能量分别取1 200 kN·m连夯及1 000 kN·m满夯;5 m~8 m区所需夯击能量取2 000 kN·m点夯及1 000 kN·m满夯;8~13 m区所需夯击能量取3 000 kN·m点夯及1 000 kN·m满夯;13 m以上区所需夯击能量取4 000 kN·m点夯及1 000 kN·m满夯。

### 2.3 夯击次数及夯沉量控制

除按现场试夯确定夯击次数外,同时要求最后两击的平均夯沉量不大于某一值来进行控制。对于2 000 kN·m能级区域,一般10~15击/点,最后两击平均夯沉量 $\leq 5$  cm;对于3 000 kN·m能级区域,一般10~15击/点,最后两击平均夯沉量 $\leq 8$  cm;对于4 000 kN·m能级区域,击数同前,但最后两击平均夯沉量 $\leq 10$  cm。

### 2.4 间隔时间

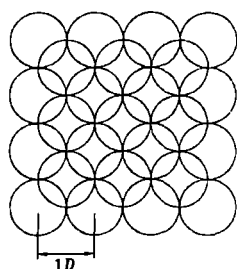
两遍夯击之间应有一定的时间间隔,以利于土中超孔隙水压力的消散,所以间隔时间取决于超孔隙水压力的消散时间。但土中超孔隙水压力的消散速率与土的类别、夯点间距等因素有关。对于渗透性好的砂土地基等,一般在数小时内即可消散完,但对渗透性差的粘性土地基,一般需要数周才能消散完。夯点间距对

超孔隙水压力消散速率也有很大的影响,夯点间距小,超孔隙水压力消散慢。反之,夯点间距大,超孔隙水压力消散快。通过施工过程中超孔隙水压力变化情况分析,对于渗透性较差,饱水性较好的弱膨胀土地基的间隔时间,一般应不少于3周;而对于渗透性好的地基可连续夯击。

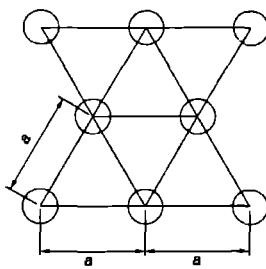
## 2.5 夯点间距及其平面布置

夯击点间距的确定,一般根据地基土的性质和要求加固的深度而定。对于细颗粒土,为便于超孔隙水压力的消散,夯点间距不宜过小。当要求加固深度较大时,第一遍的夯点间距更不宜过小,以免夯击时在浅层形成密实层而影响夯击能向深层传递。此外,还必须强调指出:若各夯点之间的距离太小,在夯击时上部土体易向侧向已夯成的夯坑中挤出,从而造成坑壁坍塌,夯锤歪斜或倾倒,而影响夯实效果。有些工程采用连夯的方法,即一个夯坑紧接另一个夯坑的夯击方法,已被实践所证实,其夯击效果较差。当然,夯点间距过大,也会影响夯实效果。根据国内经验,第一遍夯击点间距一般为5 m~9 m,以后各遍夯击点间距可与第一遍相同,也可适当减小。对要求加固深度较深,或单击夯击能较大的工程,第一遍夯击点间距应适当增大。

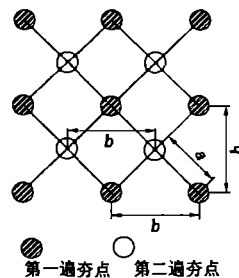
结合本工程实际,1 000 kN·m 满夯采用四夯中间搭夯一点的施工方案,每点夯击3次,见图2(a)。2 000 kN·m 点夯采用正三角形布置,点距4.5 m,见图2(b)。3 000 kN·m、4 000 kN·m 点夯采用梅花形布置,点距7 m,见图2(c)。



(a) 四夯搭夯一点



(b) 正三角形夯点



(c) 梅花形夯点

图2 各能级夯点平面布置图

## 3 浅层强夯加固效果现场检测

满夯完成待超孔隙水压力全部消散,地基稳定后,每1 000 m<sup>2</sup> 检测3个点,检验项目包括标准贯入、静力触探、瑞利波测定、室内土工实验以及荷载试验等,全面评价地基加固效果。

从2 000 kN·m、3 000 kN·m、4 000 kN·m 点夯及相应满夯区瑞利波波速测试结果看,强夯后填土可按深度分成不同加密效果区域:强加密区。一般自满夯后的表面1 m以下至一定深度范围内,加固效果最佳。在此深度内的填土完全改变了填筑结构,土粒呈薄层状定向排列,使土体变得极为密实。强加密区的深度,从起夯面算:4 000 kN·m 约8 m~10 m;3 000 kN·m 约6 m~8 m;2 000 kN·m 为5 m~6 m。将强加密区再往下一定深度视为加密区,这一区内尽管土体的填筑结构发生了显著改变,承载力、干密度等明显增大,但增大幅度及密实度较上层小,薄层状不明显。其深度:4 000 kN·m 约10 m~12 m,3 000 kN·m 约8 m~10 m;2 000 kN·m 为6 m~8 m。加密区以下的土体从检测结果看,土的强度指标、标贯击数、波速等与夯前接近,说明强夯虽有影响,但密度增加甚微,未达到理想的加固效果,故将这一深度区域理解为强夯影响区。

表1 数据显示,强夯后土的物理力学性质发生了显著变化,承载力大幅度提高。

表1 强夯前后土的主要指标对比表

土的类型	含水量(%)		孔隙比		密度/(N/m <sup>3</sup> )		压缩模量/MPa		容许承载力/Pa	
	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后	夯前	夯后
砾质粘土	30.1	26.5	0.785	0.693	20.1	20.9	10.6	16.9	280	570
粉质粘土	29.6	23.9	0.865	0.752	19.5	20.4	8.70	15.2	180	240

动力触探和静载试验结果表明,强夯后地基变形模量和反应模量大幅度提高,特别是1.2 m以下提高幅度更大。强夯前后地基模量值见表2。

表 2 强夯后地基模量试验结果表

坐标位置	地基变形模量/MPa		地基反应模量/MN/m <sup>3</sup>	
	夯前	夯后	夯前	夯后
P198/H58	18.7	37.1	76.8	266.7
P143/H62	16.2	34.8	72.1	253.6
P169/H50	20.5	38.6	82.3	270.9

瑞利波测试结果表明为中硬场地土,达到了高填土浅层强夯加固预期目的,见表 3。

表 3 强夯前后瑞利波速测试结果对比表

检测区域	能级/kN·m	夯前瑞利波/(m/s)	夯后瑞利波/(m/s)
P147/H63	2000	172	3m 以上 312;3m 以下 443
P153/H62	3000	188	4m 以上 408;4m 以下 531
P150/H65	4000	176	5m 以上 433;5m 以下 775

强夯能级越大,干密度增加越显著,地基力学指标大幅度提高,见表 4。

表 4 各能级夯后土的干密度值 对比表

深度/m	强夯能级			
	4 000 kN·m	3 000 kN·m	2 000 kN·m	满 夯
2	20.4	19.1	18.2	17.6
4	20.9	19.5	18.0	16.1
6	18.5	16.7	15.8	15.5
8	17.2	15.9	14.4	14.0
10	15.4	14.8	14.1	13.7

重型动力触探试验表明,强夯加密区填土性质明显改善,动探击数 N120 显著增加,地基承载力大幅度增加。动探 N120 平均值见图 3。

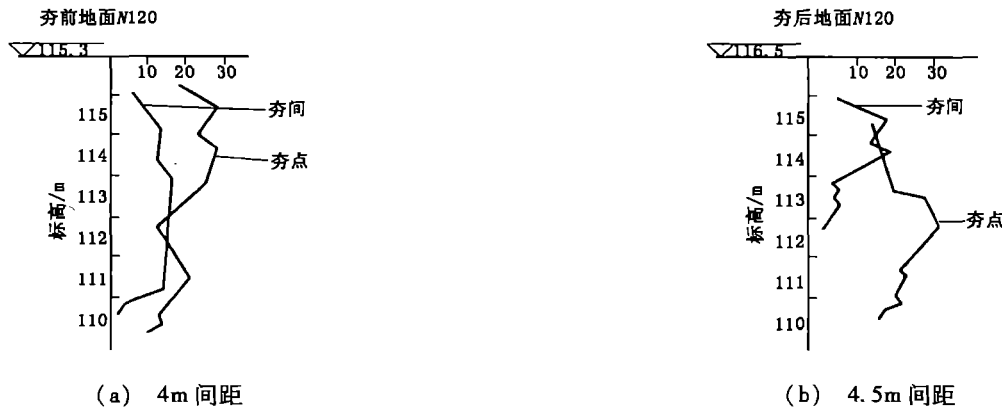


图 3 重型动力触探试验曲线

## 4 结论

- 1) 弱膨胀高填土浅层强夯的加固效应,主要表现在“硬壳层”的形成和均匀性的改善;能有效消除地基的沉降和不均匀沉降,增加土层的密实性和抗渗能力;地基强度显著提高 1~4 倍,压缩模量提高 0.5~3 倍。
- 2) 根据夯击能及振动波的传播特性,强夯时在地表附近产生的瑞利波的垂直分量,会对表层土体产生松动作用。为了尽量减少其不利影响,同时有利于消除弱膨胀土膨胀变形,减少夯坑周围出现地面隆起,可在填土表面铺垫 30 cm 砂砾(卵)石垫层,但垫层厚度不宜过大,否则有消能的作用,影响加固效果。
- 3) 夯点间距及平面布置应科学合理,如果夯点布置较密,只能在地表以下几米形成硬壳层,但对深部土层的加固却不能达到预期效果。最好的方法是:开始时以较大间距布置,先加固深层,然后再夯余下的遍数或满夯,以完成对表层的加固。

**参考文献:**

[1] 翁兴中, 杜 俭, 洪建军, 等. 机场道面大面积高填土沉降稳定分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2001, 2(5): 4-6.

[2] 曾国熙. 地基处理手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2000.

(编辑: 姚树峰)

## Design of Parameters of Airport Weak Expansion High Fill Earth Shallow - Layer Strong Ramming Consolidation

DU Jian<sup>1</sup>, XU Zhao - hui<sup>2</sup>

(1. The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China; 2. The Forth Protection Engineering Section of Air Force, Baoji, Shaanxi 721006, China)

**Abstract:** According to construction characteristic and the denaturalization feature of weak expansion earth, a design of parameters of weak expansion high fill earth shallow - layer strong ramming and the principle of consolidation treatment are discussed and determined. In accordance with the actual project, a simple, convenient and easy operating method used for determining main parameters such as ramming impact energy and ramming impact frequency, etc. is put forward. Shallow - layer mud consolidation settlement can be realized in a short time by using this method, thus the strength of the foundation is raised effectively, the allotted time of a project is shortened and the cost is reduced.

**Key words:** weak dilatable clay; high filling; tamp low - layer strengthening; parameter design

(上接第 9 页)

## Analysis of Engine Combustion Chambers for Cooling Performance under the Conditions of High Altitude and Low Velocity

JIN Tao, DENG Xin - fa, HE Li - ming

(The Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710038, China)

**Abstract:** Through the calculation of the flow rate distribution, wayside parameter and wall temperature distribution of engine flame tube under the conditions of high altitude and low velocity, the cooling characteristic of the engine combustion chamber is analyzed and investigated. The results show that, under the conditions of high altitude, the flame tube wall temperature of the same axial position is increased with the increase of Mach number; and the film cooling has a finite effective length of cooling protection, which makes the flame tube wall temperature distribute axially in a saw - tooth curve.

**Key words:** combustion chamber flame tube; wall temperature; combustion chamber cooling characteristic